

煤气化效率提升策略研究

景少龙 郭 骞

陕西渭河彬州化工有限公司 陕西 咸阳 713500

摘 要: 煤气化效率直接决定煤化工项目的经济性与碳排放水平。本文系统构建了煤气化效率评价体系,明确碳转化率、冷煤气效率等核心指标的物理意义与关联关系,从原料特性、操作参数、设备结构三个维度分析了影响气化效率的关键因素。在此基础上,从原料预处理、工艺参数优化、气化炉结构改进、氧源替代及热量系统集成五个方面提出了效率提升策略,并探讨了等离子体辅助、催化气化、超临界水气化及化学链气化等新型技术的应用前景。

关键词: 煤气化; 碳转化率; 冷煤气效率

引言: 煤气化是现代煤化工的龙头技术,气化效率每提升 1 个百分点,百万吨级煤制烯烃项目年均可增效数千万元,同时减少数万吨二氧化碳排放。然而,国内现役气化装置的平均冷煤气效率为 75%-80%,与国际先进水平存在 3-5 个百分点的差距,部分装置因煤质波动、操作粗放、余热回收不足等因素,实际运行效率长期偏低。提升气化效率是涉及煤质调控、工艺改进、设备升级、能量集成的系统性问题,本文立足工程应用视角,构建完整的效率提升策略体系,为气化装置节能降耗提供技术指引。

1 煤气化效率评价体系

1.1 核心效率指标定义

煤气化效率的核心评价指标包括碳转化率、冷煤气效率及气化热效率三项。碳转化率指原料煤中固定碳转化为合成气中碳元素的比例,反映气化反应的彻底程度,气流床气化碳转化率通常可达 96%-99%,流化床与固定床略低。冷煤气效率是合成气化学能与入炉煤化学能的比值,是衡量气化能量转化效率的核心指标,大型气流床装置的冷煤气效率一般在 75%-83% 之间。气化热效率则在冷煤气效率基础上计入余热回收的贡献,采用废锅流程的装置可达 85%-90% 以上。三项指标各有侧重:碳转化率侧重反应深度,冷煤气效率侧重化学能转化,热效率侧重综合能效。

1.2 各指标间的关联与制约关系

三项效率指标之间存在复杂的耦合制约关系。碳转化率与冷煤气效率通常呈正相关,碳转化越充分,合成气产率越高,冷煤气效率相应提升。但这一关系在高温区间会出现背离:气化温度过高虽可提升碳转化率,却会消耗过量氧气并增加合成气显热,若余热回收能力不

足,冷煤气效率反而下降。冷煤气效率与气化热效率之间也存在矛盾:为回收更多显热需增加废锅换热面积,但过度冷却会增加系统压降和投资成本。此外,提升碳转化率往往需要延长停留时间或提高温度,导致设备尺寸增大、耐火材料损耗加快。理解指标间的制约关系,有助于在工艺优化中避免局部优化陷阱,从系统层面寻求综合最优解^[1]。

1.3 效率损失的主要来源分类

气化过程的效率损失可系统归为化学损失、热损失与机械损失三大类别。化学损失的核心来源是未燃碳,即灰渣中残留的固定碳,流化床气化飞灰含碳量可达 10%-20%,是碳转化率偏低的主要原因。热损失占比更大,主要包括高温合成气携带的显热、气化炉散热损失及灰渣显热,其中合成气显热占总热损失的 60%-70%,是余热回收的主要对象。机械损失主要包括煤粉制备电耗、空分系统能耗及气化炉压降损失,其中空分制氧能耗占气化装置总电耗的 60%-70%,是间接效率损失的主要来源。

2 影响煤气化效率的关键因素分析

2.1 原料煤特性的影响

原料煤的理化特性是决定气化效率的基础因素。煤的反应活性直接影响气化反应速率,活性高的煤在较低温度下即可达到理想的碳转化率。灰分是惰性组分,不参与气化反应却会吸收反应热、稀释合成气,灰分每升高 5 个百分点,冷煤气效率约下降 1.5-2 个百分点。灰熔融特性决定了气流床气化的最高操作温度,灰熔点过高时需提高炉温以保证液态排渣,导致氧耗增加。此外,煤的哈氏可磨指数影响制粉能耗,内水含量影响水煤浆浓度上限,硫分和碱金属含量影响炉内结渣腐蚀。通过

配煤优化改善入炉煤综合特性,是提升气化效率的首要环节。

2.2 操作参数的影响

操作参数中氧煤比、汽煤比和反应温度的耦合关系最为关键。氧煤比是最敏感的操作参数,每增加 0.01 标立方米/公斤煤,气化温度约升高 30-50℃,碳转化率随之提升,但过量氧气会将部分合成气燃烧为 CO_2 和 H_2O ,导致冷煤气效率先升后降。水煤浆气化最优氧煤比通常为 0.45-0.55,干煤粉气化则为 0.35-0.45。汽煤比主要影响水煤气变换反应的平衡,适量蒸汽可促进 H_2 生成,但蒸汽过量会吸收反应热、降低炉温。气化温度需在煤灰流动温度以上且不超过耐火材料耐受极限的窗口内运行。气化压力升高可提高单位容积产气率,但高于 4 兆帕后边际增益递减。操作参数优化需在效率与稳定性之间寻求平衡。

2.3 气化炉结构与流场的影响

气化炉的几何结构与内部流场决定了气固接触效率和反应停留时间分布。多喷嘴对置式气化炉通过四喷嘴撞击形成湍流强化区,混合强度高于单喷嘴顶置,碳转化率可提升 1-2 个百分点。但喷嘴数量增加也带来了偏流风险,各喷嘴流量偏差超过 5% 时,炉内流场严重不均。烧嘴结构直接影响雾化粒径,粒径每增加 10 微米,完全气化所需停留时间延长约 15%。水冷壁结构允许更高气化温度,适配高灰熔点煤,但壁面附近温度梯度大会抑制近壁区反应;耐火衬里绝热性好、温度均匀,但高温侵蚀快。流化床气化炉的布风板结构和料层高度决定流化质量,布风不均会形成沟流和死区,大幅降低碳转化率^[2]。

3 煤气化效率提升策略

3.1 原料预处理策略

原料预处理是从源头提升气化效率的优先措施。对于水煤浆气化,煤浆浓度每提高 1 个百分点,冷煤气效率约提升 0.6-0.8 个百分点。采用级配研磨技术可在不添加添加剂的情况下将浓度提升至 65%-67%,添加分散剂可使浓度突破 68%。对于干煤粉气化,煤粉 200 目通过率应从 70%-75% 提升至 80%-85%,以提高反应速率,但需兼顾制粉电耗。配煤优化是解决单一煤种特性缺陷的有效手段:将高灰熔点煤与低灰熔点煤掺配,可调控灰渣黏温特性,使气化温度窗口拓宽 20-30℃;将低活性煤与高活性煤掺配,可在不提高气化温度的情况下改善碳转化率。

3.2 工艺操作参数优化

工艺操作参数优化是成本最低、见效最快的提效手段。建立基于机理或数据模型的操作优化系统,可根据入炉煤在线分析实时调整参数。氧煤比自寻优可通过监测合成气中 CH_4 和 CO_2 含量判断反应状态: CH_4 偏高表明温度偏低,应增加氧量; CO_2 偏高表明氧量过剩,应减少氧量。汽煤比优化需关注下游 H_2/CO 比例需求,对于需要高 H_2 比的生产,适当增加蒸汽可减少变换单元负荷。气化压力设定需考虑下游工段需求。对于变负荷装置,应建立负荷-参数关系曲线,在不同工况下切换最优参数组合,并定期标定在线仪表以确保测量准确。

3.3 气化炉结构改进

气化炉结构改进是从硬件层面提升效率的根本措施。烧嘴改进方向包括:采用多通道烧嘴结构,利用高速气流剪切实现精细雾化;烧嘴端部采用耐磨耐热合金或陶瓷涂层,延长使用寿命。炉膛结构优化重点在于改善流场均匀性,多喷嘴对置式布局需配套流量均衡控制。优化炉膛高径比和锥段角度可将飞灰含碳量降低 1-2 个百分点。排渣装置改进方面,固态排渣炉应优化灰锁斗操作循环;液态排渣炉需控制渣层厚度和渣口直径,确保顺畅排渣。增设渣池内碳回收装置可回收渣中残碳返回炉膛^[3]。对于现役装置,可考虑将耐火衬里更换为水冷壁结构,使气化温度提升 50-100℃。

3.4 氧源替代与富氧/纯氧气化

氧气供给能耗占气化装置总电耗的 60%-70%,氧源替代是降低间接能耗的重要方向。变压吸附制氧在 90% 纯度以下具有能耗优势,适用于富氧气化场景。采用 95% 富氧替代 99.6% 纯氧,可将制氧电耗降低 25%-30%,适合下游不需要高纯度合成气的场景。与可再生能源耦合的绿氧替代是零碳路径的终极方向,利用弃电制氢联产氧气,使气化实现零碳排放,但当前面临电解槽成本高的问题。对于已建成的大型深冷空分装置,可通过优化膨胀机效率、提高主换热器传热效率降低能耗 5%-10%。空分与气化装置的负荷协同控制,也是提升系统综合效率的有效手段。

3.5 热量回收与系统集成

热量回收是提升综合热效率的核心手段。气流床气化合成气显热占入炉煤热值的 15%-20%,采用废锅流程替代激冷流程,每吨煤可产高压蒸汽 0.8-1.2 吨,使热效率从 80% 提升至 90% 以上。废锅入口合成气含尘浓度高,积灰结渣是主要障碍,需配套吹灰装置。低温段余热可用于预热锅炉给水或供暖。排渣温度约 300-500℃,采用流化床冷却器回收渣显热。系统集成层面,应打破

气化、变换、净化、合成等工段间的热壁垒：变换反应放热可预热进料煤浆；低温甲醇洗冷量可冷却合成气。采用夹点技术优化全厂换热网络，可降低公用工程消耗 15%-25%。

4 新型技术对效率提升的推动

4.1 等离子体辅助气化

等离子体辅助气化利用高温等离子体射流作为热源和活性基团来源，可突破传统气化的温度限制和反应动力学瓶颈。等离子体炬产生 5000℃以上的高温，使煤粉瞬间热解和气化，反应速率较传统工艺提升 1-2 个数量级，停留时间从数秒缩短至毫秒级。等离子体中的高能电子和活性自由基能有效破坏煤的大分子结构，降低反应活化能，使低活性煤种实现高效转化。该技术对煤种适应性极强，可气化高灰分、高水分煤甚至垃圾衍生燃料，碳转化率可达 99% 以上。但当前面临电耗过高（每吨煤耗电约 600-1000 千瓦时）和电极寿命短的问题，适合在有廉价电力的地区应用。微波等离子体因无需电极、可长周期运行而受到关注，但单炬功率尚难满足工业规模需求。目前该技术主要用于处理高危废弃物和特种燃料，在常规煤化工领域的大规模应用仍需技术突破。

4.2 催化气化技术

催化气化通过添加催化剂降低气化反应活化能，可在较低温度下实现较高的气化速率和碳转化率。碱金属和碱土金属是优良催化剂，其中钾盐的催化效果最为显著，可将气化起始温度降低 100-150℃。催化机理包括：催化剂与碳基质形成表面络合物改变反应路径；促进电子转移加速化学键断裂。工业应用中催化剂通常与煤粉混合，但存在回收困难和成本问题。示范项目采用水洗法回收排渣中的钾盐，回收率可达 70%-80%，但流程复杂、能耗较高。另一路线是采用廉价一次性催化剂（石灰石、白云石等），成本低但活性不足。负载型催化剂可减少贵金属用量，是未来研究方向^[4]。目前催化气化尚未大规模工业化，主要瓶颈在于催化剂寿命、回收经济性与反应器积灰结焦问题。

4.3 超临界水煤气化

超临界水煤气化以超临界水（温度 374℃以上、压力 22 兆帕以上）为反应介质，利用其独特的溶解和传质特性实现煤的完全气化。超临界水兼具液体的高密度和气体的高扩散系数，能溶解大多数有机物，消除了传

统气化中的气固传质限制。该技术优势在于：无需干燥高水分煤，适合低阶煤直接气化；反应温度较低（500-700℃），无焦油和酚类副产物；无机盐在超临界水中溶解度极低，易于分离回收。碳转化率可达 98% 以上，冷煤气效率超过 80%，适合小规模分布式气化场景。技术瓶颈主要是设备材料腐蚀和高压带来的高投资成本，超临界环境下腐蚀速率是常规条件的 10 倍以上，需采用镍基合金或陶瓷内衬。连续式反应器的发展推动了工程化进程，但距离百吨级工业示范仍有距离。

4.4 化学链煤气化

化学链气化基于氧载体循环，通过氧载体在空气反应器和燃料反应器之间循环传递氧，实现煤与空气的间接接触，避免氮气稀释合成气，同时实现原位碳捕集。燃料反应器中煤与氧载体（ Fe_2O_3 、 CuO 、 NiO 等）反应，煤转化为 CO_2 和 H_2O ；还原后的氧载体进入空气反应器再氧化，恢复载氧能力。该技术可省去空分装置，制氧能耗为零，产物 CO_2 浓度可达 90% 以上，无需额外分离即可封存。核心挑战是氧载体的反应活性维持和机械强度保持，循环过程中易发生烧结和相变导致活性退化。研究聚焦于复合氧载体开发和惰性载体掺杂。化学链气化尚处中试阶段，已建成 10-100 吨/天的试验装置，但长期运行稳定性和氧载体寿命仍需突破。

结束语

煤气化效率提升是煤化工行业节能降碳的核心课题。本文从效率评价体系出发，系统分析了原料特性、操作参数、设备结构对气化效率的影响机制，从原料预处理、工艺优化、结构改进、氧源替代及热量集成五个维度提出了可实施的提效策略，并探讨了等离子体辅助、催化气化、超临界水气化及化学链气化等新型技术的发展前景。未来随着智能化调控技术与新型气化工艺成熟，煤气化效率有望持续提升。

参考文献

- [1] 李鹏, 王会芳, 刘元杰, 等. 煤气化廉价催化剂研究进展 [J]. 化工管理, 2023(16): 72-74, 112.
- [2] 王清臣. 煤气化技术及其发展趋势探讨 [J]. 化工管理, 2021(18): 113-114.
- [3] 何耀龙, 温晓楠, 张后进, 等. 浅谈科林煤气化技术研究 [J]. 广州化工, 2025, 53(2): 170-173.
- [4] 吴超, 陶林, 宋爱, 等. 煤气化灰渣的综合利用研究进展 [J]. 广州化工, 2025, 53(11): 26-29.